УДК 622.286.4(043.3)

М.Г.МЕНЖУЛИН
профессор кафедры безопасности производств и разрушения горных пород
А.В.ТРОФИМОВ
Горный факультет, группа ВД-02

СВЯЗЬ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Рассмотрена зависимость прочности горных пород от времени их нагружения согласно термокинетической теории прочности. Расчетным путем определены термокинетические параметры горных пород, а также, с учетом данных о трещиноватости, проведено построение расчетных зависимостей и последующее сравнение их с результатами эксперимента. В результате получены значения динамической прочности на растяжение (отрыв) и сдвиг, необходимые для дальнейшего определения параметров буровзрывных работ.

The article studies dependences of rock strengths on the time of their stressing basing on the thermal-kinetic theory of strength. The main task of the research was to calculate thermo-kinetic features of rocks and, taking into account cleavage data, to build up calculation dependences and compare them with experimental results. As the result, indices of dynamic tensile (pull) and shear strengths have been received, which are necessary for subsequent calculation of parameters of drilling and blasting operations.

От эффективности ведения буровзрывных работ (БВР) зависят технико-экономические показатели работ рудных карьеров и карьеров строительных материалов. В настоящее время при проектировании БВР в РФ в качестве основных характеристик разрушаемого материала (горных пород) принимают предел прочности на одноосное сжатие и категорию по шкале трещиноватости. Данные методики являются результатом большого практического опыта, накопленного при ведении БВР еще в советские времена. Но они эффективны при применении одинаковой на всех типах предприятий буровой, погрузочной, транспортной и других видов горной техники, а также ограниченного выбора взрывчатых веществ (ВВ). Современный рынок предлагает огромное разнообразие как горной техники с различными техническими характеристиками, так и ВВ с большим выбором детонационных параметров. Применение устаревших методик в современных условиях зачастую приводит к нерациональному использованию природных и производственных ресурсов. Поэтому целесообразно развивать новые подходы к вопросу определения прочности разрушаемого материала.

Современное учение о разрушении нагруженных твердых тел не завершено даже в своей принципиальной основе – не выяснены физическая природа и критерии элементарного события. Также остается открытым вопрос определения прочности горных пород при динамическом нагружении.

Физической основой кинетической теории механического разрушения явились экспериментальные данные по временной и температурной зависимости прочности твердых тел. Было установлено, что при заданном напряжении прочность зависит от длительности пребывания исследуемого материала в напряженном состоянии. Прочность при малом времени нагружения выше, чем при длительном нагружении.

Наиболее простой и легко определяемой величиной может стать величина долговечность τ твердых тел под нагрузкой, т.е. время существования тела в нагруженном состоянии с момента приложения нагрузки до его разрушения. С точки зрения кинетической концепции разрушения долговечность

может служить фундаментальной характеристикой прочности испытуемого материала. Долговечность зависит от приложенного напряжения и температуры.

При кинетическом подходе разрушение рассматривается как реально развивающийся во времени процесс (процесс накопления нарушений), характеризовать который каким-либо критическим напряжением нельзя. Естественно характеризовать его некоторой скоростью процесса (скоростью накопления нарушений) либо временем, за которое процесс развивается до распада тела на части.

В кинетической теории прочности долговечность разрушения τ определяется формулой С.Н.Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right),$$

где U_0 – энергия активации разрушения, Дж/моль; γ – структурный коэффициент, Дж/м^2; τ_0 – период колебаний молекул в монолитной среде, $\tau_0 \sim 10^{-13}$ с$^{-1}$; k – постоянная Больцмана; $kT = 2463$ Дж/моль при нормальных условиях; σ – приложенная нагрузка, Па.

Нахождение термокинетических параметров осуществляется по следующим теоретическим формулам:

1. Энергия активации разрушения для трещин сдвига

$$U_{0\text{ñää}} = Q_{\text{ñää}} \approx 0{,}032 T_{\text{ïë}},$$

где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления, С°.

2. Энергия активации для трещин отрыва

$$U_{0\text{îòð}} = Q_{\text{ñóáë}} \approx 0{,}064 T_{\text{ïë}}.$$

3. Структурный коэффициент формулы для долговечности разрушения:

• для трещин сдвига (в кубических метрах на моль)

$$\gamma_{\text{ñää}} = \frac{\mu 10^{-4}}{\rho}\sqrt{\frac{2l_{\text{òð}}}{a_0}},$$

где ρ – плотность среды, кг/м^3;

• для трещин растяжения (отрыва)

$$\gamma_{\text{ðàñò}} = \frac{a^3 \varepsilon_{\max}}{2}\sqrt{\frac{2l_{\text{òð}}}{a_0}},$$

где $\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma^*_{\text{èä}}}{E}$ – предельная деформация; E – модуль упругости, Па; a_0 – постоянная кристаллической решетки, м; $\sigma^*_{\text{èä}} = \left(\frac{\gamma_s E}{a_0}\right)^{1/2}$ – идеальная прочность, Па; γ_s – поверхностная энергия, Дж/м^2.

Поверхностная энергия связана с энергией активации разрушения соотношением

$$\gamma_s = \frac{4U_0}{N_{AV}\pi a_0^2}.$$

Для подтверждения эффективности термокинетической теории прочности были проведены испытания с образцами гранита. Определение размеров микротрещин в образцах горной породы (одна из частей отполирована) выполнялось с помощью микроскопа МИР-2.

В шести различных зонах образца измерялось число трещин различной длины. По результатам измерений строился график распределения трещин по размерам (рис.1), с учетом этого принималась эффективная длина трещины. Эффективной считаем наиболее распространенную длину трещины.

На графике (рис.1) видно, что максимальное количество трещин находится в диапазоне $l_{\text{òð}} = 0{,}8 \div 2$ мм. Испытание образцов на прочность производилось при помощи устройства ИСМ-190 (индикатор механических свойств «Викинг»), позволяющего установить предел прочности на растяжение. Испытания проводились согласно методике определения механических свойств нагружением сферическими инденторами.

При испытаниях образцов были выполнены следующие этапы работ:

• фиксировалось показание динамометра в момент раскола образца;

• измерялась площадь фактической поверхности разрыва образца по его контурам;

• с помощью секундомера фиксировалось время с начала момента нагружения образца до его разрушения.

После разрушения образцов вычислялся предел прочности на одноосное растяжение $\sigma_{\text{раст}}$ по формуле

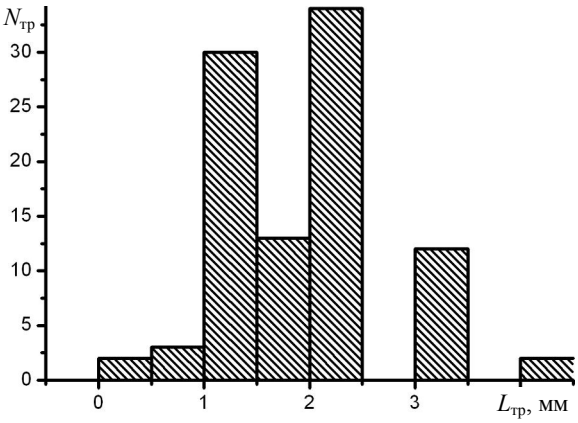


Рис.1. Распределение трещин по размерам

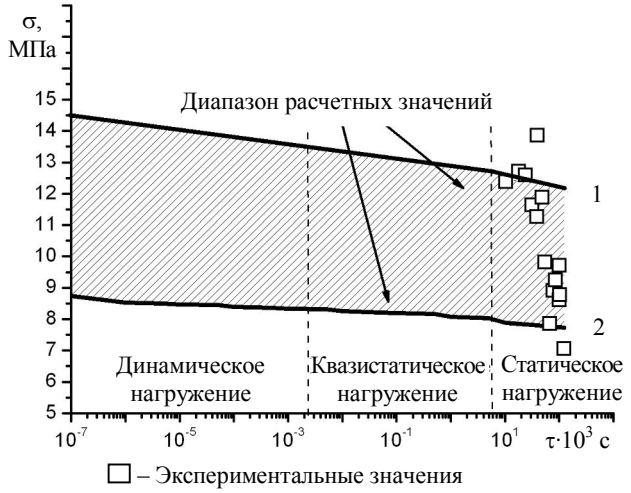


Рис.2. Зависимость предела прочности от длительности нагружения

1 – $l_{тр}$ = 0,8 мм; 2 – $l_{тр}$ = 2 мм

$$\sigma_{ðàñò} = 0{,}75\frac{P}{S_{ðàçð}}K_{ì},$$

где $K_м$ – безразмерный масштабный коэффициент, $K_м = 24941$; P – максимальная разрушающая нагрузка, Н; $S_{разр}$ – фактическая площадь поверхности разрыва, мм^2.

При разрыве больше двух частей фактическая площадь поверхности вычисляется по формуле

$$S_{ðàçð} = 2\frac{S_{01} + S_{02} + ... + S_{0n}}{n},$$

где S_{01}, S_{02}, …, S_{0n} – площади полуповерхностей по каждому из направлений разрыва.

Экспериментальные результаты и расчетные значения представлены в графическом виде (рис.2). Диапазон расчетных кривых построен с учетом разных эффективных длин трещин. Из графика видно, что наиболее важные факторы, оказывающие влияние на прочность горных пород, – это длительность нагружения и размеры эффективной трещины.